

УДК 579.68(268.45)

МИКРОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЦИКЛОВ УГЛЕРОДА И СЕРЫ В КАРСКОМ МОРЕ

© 2010 г. А. С. Саввичев¹, Е. Е. Захарова¹, Е. Ф. Веслополова¹, И. И. Русанов¹,
А. Ю. Леин², М. В. Иванов¹

¹Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: savvichev@mail.ru

Поступила в редакцию 03.12.2008 г., после доработки 27.04.2009 г.

В работе представлены результаты микробиологических, биогеохимических и изотопно-геохимических исследований Карского моря. Материалы для исследований получены в сентябре 2007 г. в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Исследования проводили в северной, центральной, юго-западной акватории Карского моря, а также в Обском заливе. Получены количественные характеристики общей численности бактерий и активности микробных процессов в водной толще и донных осадках. Общая численность бактериопланктона (БП) варьировала от 250 тыс. кл. мл⁻¹ в северной акватории до 3 млн кл. мл⁻¹ в Обском заливе. Численность БП зависела от содержания водной взвеси. Чистая продукция БП была минимальной в центральной акватории 0.15–0.2 мкг С л⁻¹ сут⁻¹, максимальной 0.5–0.75 мкг С л⁻¹ сут⁻¹ в Обском заливе. На большинстве станциях Обского разреза в составе органического вещества взвеси преобладал изотопно-легкий (–28.0...–30.18‰) органический материал терригенного генезиса. Содержание метана в поверхностном водном слое варьировало от 0.18 до 2.0 мкл СН₄ л⁻¹, а интенсивность метаноокисления от 0.1 до 100 нл СН₄ л⁻¹ сут⁻¹. Концентрация метана в поверхностном слое донных осадков колебалась от 30 до 300 мкл СН₄ дм⁻³, интенсивность метанообразования от 44 до 500 нл СН₄ дм⁻³ сут⁻¹, а интенсивность метаноокисления от 30 до 2000 нл СН₄ дм⁻³ сут⁻¹. Интенсивность сульфатредукции варьировала от 4 до 184 мкг S дм⁻³ сут⁻¹.

Начало микробиологических исследований в Карском море связано с именем Б.Л. Исаченко, впервые установившего повсеместное распространение микроорганизмов в воде и донных осадках арктических морей [6]. В работах А.Е. Крисса приводятся данные учетов сапротрофных микроорганизмов в водной толще открытой части Карского моря, полученные путем высевов на питательные среды [8]. По данным Н.Г. Теплинской общая численность бактерий в юго-западной части моря составляет 18–150 тыс. кл. мл⁻¹ [25]. Высокая концентрация бактериопланктона (более 500 тыс. кл. мл⁻¹) обнаружена в поверхностных водах Байдарацкой губы [9].

В августе–сентябре 1993 г. состоялся 49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев” в Карское море. Полученные во время рейса материалы стали основой для многочисленных публикаций, посвященных комплексной оценке состояния Карского моря, а также эстуариев рек Обь и Енисей [12, 2, 1]. В этом рейсе были также проведены приоритетные исследования, связанные с учетом микроорганизмов и количественной оценкой интенсивности микробных процессов циклов углерода и серы в водной толще и донных осадках Карского моря [13, 16, 10]. Следующий этап в изучении Карского моря связан с экспедициями НИС “Академик Борис Петров” в период 1995–2003 гг., в которых проводились биогеохими-

ческие и радиоэкологические исследования. Получен обширный материал по содержанию и изотопному составу органического и карбонатного углерода осадков, планктону и органическому веществу взвеси [3, 29, 26]. В августе–сентябре 2001 г. были проведены исследования и выполнены расчеты общей численности бактерий и величины бактериальной продукции, с использованием метода меченого лейцина, в акватории Карского моря, а также в эстуариях Оби и Енисея [32].

В XXI веке актуальность проведения биогеохимических и микробиологических исследований в Карском море резко возрастает. Это связано с разведкой и освоением запасов углеводородов как в бассейне реки Обь, так и в акваториях арктического шельфа. Известно, что биотический потенциал самоочищения в экосистемах Арктики не высок. Знание активности микробных процессов трансформации соединений углерода и серы необходимо для понимания биогеохимических особенностей экосистемы Карского моря и Арктики в целом.

Поэтому основной целью настоящей работы явилось получение достоверных количественных характеристик численности бактериопланктона (БП), интенсивности ключевых микробных процессов круговорота углерода и серы: метаногенеза (МГ) и окисления метана (МО), интенсивности сульфат-

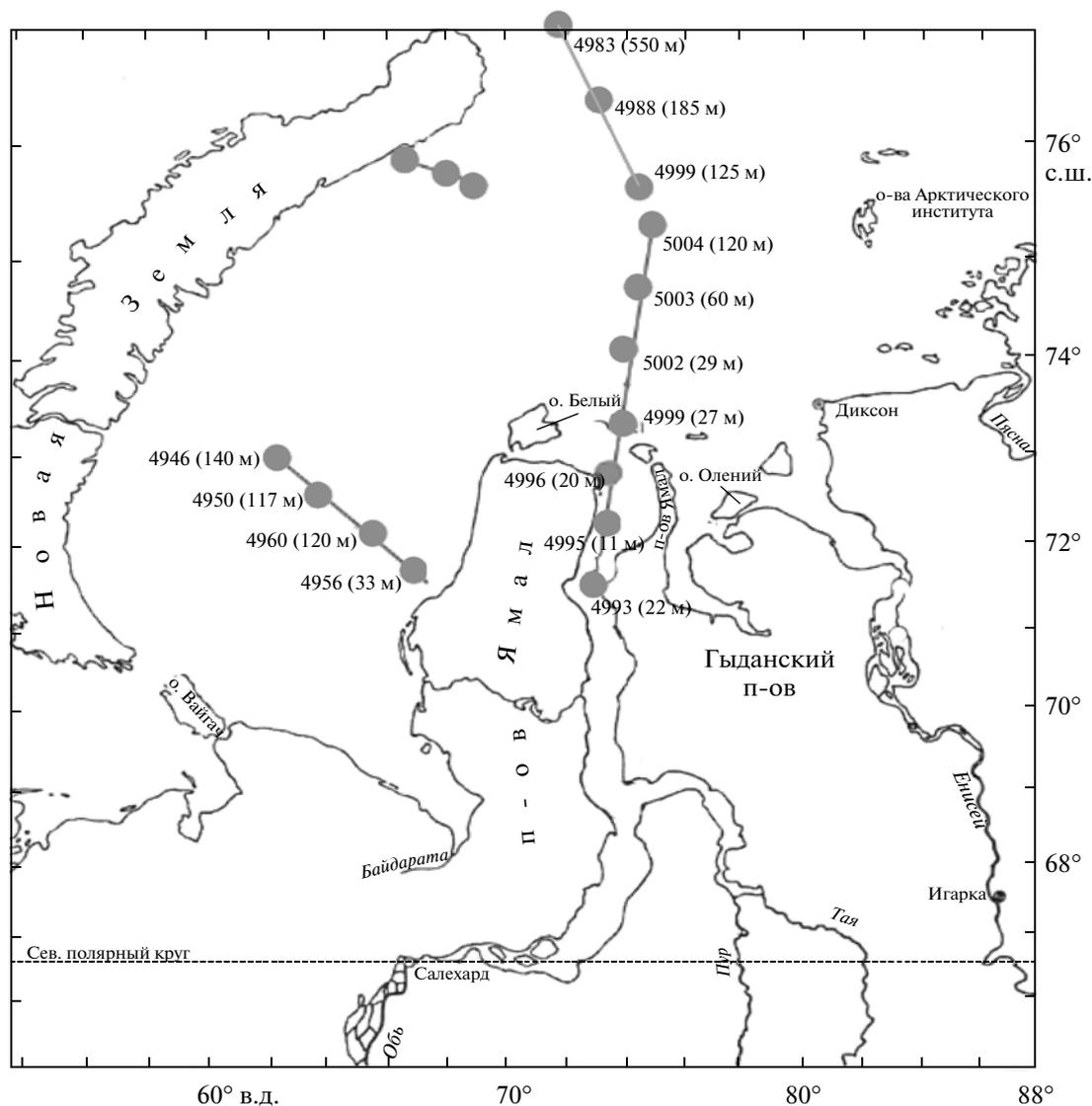


Рис. 1. Расположение станций НИС "Академик Мстислав Келдыш" (54-й рейс, сентябрь 2007 г.).

редукции (СР) и темновой ассимиляции CO_2 (ТАУ), в воде и донных осадках, а также определение изотопного состава углерода в водной взвеси в Карском море и эстуарии реки Обь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы для исследований получены в сентябре 2007 года в 54-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш". Исследована значительная часть Карского моря (рис. 1), включая акваторию к западу от п-ва Ямал (далее Ямальский профиль), а также меридиональный профиль от эстуария Оби до желоба Святой Анны в северной части Карского моря (далее Обский профиль).

Методы исследования. Отбор проб воды проводили с поверхностного и придонного горизонтов, а также из области пикноклина и зон максимальных

значений флуоресценции. Для отбора водных проб использовали батометры Нискина объемом от 5 до 30 литров, установленные на системе Rozett (Woods Hole, США). Горизонты отбора выбирали после предварительного гидрофизического зондирования на основании данных, полученных с буксируемого зонда и STD-зонда SBE-19 Plus (Seabird Electronics), датчиков флуоресценции и мутности, установленных на системе Rozett. Отбор воды из батометров проводили с изливом, во избежание захвата кислорода воздуха, в стеклянные флаконы и закрывали газонепроницаемой пробкой.

Пробы донных осадков отбирали трубкой Ниёмисте. Из вертикально установленной на палубе трубки с осадком отбирали наддонную воду (далее термин наддонная вода будет использоваться только для образцов, отобранных из тубки Ниёмисте) в 100 мл шприц с тонкой силиконовой трубкой. Ото-

бренный слой наддонной воды соответствовал 2–10 – 2–20 см над поверхностью осадка. Подачу кер-на с осадком осуществляли с помощью поршня в нижней части трубки, что позволяло осуществлять послойный отбор проб без перемешивания образца. На опорных станциях были изучены осадочные отложения на глубину до 3 м. Отбор проб этих осадков проводили из керна геологических труб большого диаметра (ТБД). Ненарушенные образцы осадков отбирали в 5-см³ пластиковые шприцы с резиновым поршнем и обрезанным краем и закрывали резиновой пробкой. Окислительно-восстановительный потенциал и значения pH определяли параллельно с отбором проб при помощи потенциометра “pH WTW/Set-1” (Германия). Все эксперименты с водой и осадками проводили в первые часы после отбора проб при температурах близких *in situ*, в интервале от 0 до +6°C.

Для учета общей численности и биомассы бактериопланктона (БП) пробы воды отбирали в стеклянные пузырьки объемом 30 мл и фиксировали раствором глутаральдегида, конечная концентрация которого в пробе составляла 2%. 5–10 мл фиксированной пробы фильтровали на черные поликарбонатные фильтры (Миллипор) с диаметром пор 0.2 мкм. Фильтры окрашивали раствором акридинового оранжевого [27]. Препараты просматривали с помощью люминесцентного микроскопа ЛЮ-МАМ И-2 с системой визуализации Image Score Color (M) при увеличении $\times 1000$. Учет клеток проводили с экрана монитора в 20-ти полях зрения. Количество клеток, ассоциированных с частицами детрита, учитывали отдельно. Объемы бактериальных клеток вычисляли на основании измерений их длины и ширины на снимках, сделанных при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-U3 (Япония). Объем кокков вычисляли по формуле для объема шара, палочек – по формуле для объема цилиндра. Было промерено около 200 клеток. При расчетах биомассы бактерий вводили поправочный коэффициент 1.6 [22].

Производство бактериопланктона определяли радиоуглеродным методом используя значения интенсивности темновой CO₂ ассимиляции в составе клеток, а также внеклеточных экзометаболитов и эмпирический коэффициент 20, выведенный Ю.И. Сорокиным для бактериопланктона морской воды, выражающий отношение продукции бактерий к гетеротрофной ассимиляции CO₂ [23]. На основе данных чистой продукции бактериопланктона и биомассы бактерий рассчитывали P/V коэффициент (отношение чистой продукции к биомассе), известный также как $\mu = VP/V$ [28]. При расчете P/V коэффициента для приведения данных к одним размерностям принимали, что содержание углерода составляет 10% от сырого веса биомассы [35].

Для определения времени удвоения общей численности бактерий (G) в водных пробах использовали метод, разработанный Ивановым [5]. Для удаления зоо- и фитопланктона свежееотобранную водную пробу фильтровали через мембранный фильтр с

диаметром пор 2 мкм. Из фильтрата по изложенной выше методике готовили образец для микроскопического учета численности БП. Остальной фильтрат разливали в склянки без пузырька воздуха, закрывали газонепроницаемой пробкой и выдерживали в холодильнике при температуре 2.0–2.5°C, т.е. близкой к естественной, после чего образец фиксировали и готовили препарат для учета численности БП. Время экспозиции отличалось от предложенного в оригинальной методике и составляло 3 и 5 суток. Расчет времени удвоения бактерий проводили по формуле

$$G = t \lg 2 / \lg B_f - \lg b_f,$$

где G – время удвоения, сут, t – время экспозиции пробы (сут), B_f – численность бактерий по окончании опыта, b_f – исходная численность бактерий в фильтрате.

Интенсивности микробных процессов: темновой ассимиляции углекислоты (ТАУ), МГ и МО определяли радиоизотопным методом с использованием NaH¹⁴CO₃, ¹⁴CH₄, ¹⁴CH₃COONa. В шприцы (с образцами осадков) и стеклянные флаконы (с водными образцами) вводили по 0.1 мл меченых соединений (60 мкКи на 1 л воды и 4000 мкКи на 1 дм³ осадка). Инкубацию проб проводили в холодильнике, устанавливая температуру близкую к нативной, в течение 12–72 часов. После инкубации пробы фиксировали 1 мл 2 М раствора КОН. Разделение ¹⁴C-продуктов и измерение их радиоактивности проводили (на сцинтилляционном счетчике Rack-Betta 1219, ЛКВ, Швеция) ранее описанными методами [4, 19]. При расчете интенсивности МО учитывали радиоактивность метки, перешедшей в углекислоту, образовавшуюся при окисления ¹⁴C метана, и радиоактивность метки, перешедшей в биомассу бактерий и внеклеточное растворенное органическое вещество (органические экзометаболиты). При расчете интенсивности ТАУ учитывали ¹⁴C–CO₂ как в составе клеток бактерий, так и в составе внеклеточного растворенного органического вещества (РОВ). Величину интенсивности образования РОВ определяли по разнице величин, полученных при окислении персульфатом калия общего органического вещества и биомассы, осаждаемой на фильтрах [17]. Все представленные в таблицах данные являются средним арифметическим от трех экспериментальных повторностей. Доверительный интервал для численных показателей ТАУ, МГ, МО, СР варьирует от 10 до 20%.

Для определения изотопного состава углерода органического вещества ($\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$) водной взвеси пробы воды фильтровали через предварительно прокаленные стекловолнистые фильтры GF/F диаметром 47 мм. Количество взвеси определяли по весовой разнице отмытых от морской соли и высушенных фильтров. Точность взвешивания 0.1 мг. Измерение $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ проводили на масс-спектрометре “Delta Plus” (Германия). Точность определений $\pm 0.1\text{‰}$.

Таблица 1. Физико–химические параметры и микробиологические характеристики водной толщи Карского моря

№ ст. (глуб., м). Расстояние по разрезу, мили	Горизонт, м	T, °C	Соленость, л ⁻¹	Взвесь, мг л ⁻¹	δ ¹³ C–C _{орг} , ‰	ОЧМ* тыс. кл. мл ⁻¹	Ср. объем клетки, мкм ³	Биомасса БП, мкг л ⁻¹
Станции профиля устье р. Обь–желоб Св. Анны (360 миль)								
4993 (22 м) 0	0	7.2	0.05	22.82	–30.18	1950 (200)	0.11	215
	18	7.2	0.05	23.20	–30.18	3170 (300)	0.18	571
4995 (11 м) 56	0	4.9	3.5	14.70	–29.11	840 (90)	0.17	143
	9	4.4	8.0	52.96	–29.61	890 (90)	0.12	107
4996 (20 м) 77	0	3.2	20.5	27.07	–29.07	2540 (240)	0.13	330
	16	2.3	24.0			710 (80)	0.21	149
4999 (27 м) 101	0	3.0	10.0	9.00	–30.07	1080 (100)	0.11	119
	21	0.0	27.0	30.88	–28.48	1070 (100)	0.2	214
5002 (29 м) 235	0	3.0	19.0	0.70	–29.37	700 (80)	0.19	133
	13	1.0	25.0			830 (80)	0.19	158
	22	–1.0	32.0	4.11	–28.16	880 (80)	0.19	167
5003 (60 м) 252	0	3.0	19.0	0.48	–29.92	740 (70)	0.2	148
	14	0.5	29.0			580 (60)	0.2	116
	56	–1.0	32.5	1.55	–28.71	450 (50)	0.2	90
5004 (120 м) 262	0	2.5	19.0	0.70	–29.75	550 (60)	0.17	94
	20	–0.5	28.0			180 (20)	0.18	32
	107	–1.0	33.0	0.96		220 (20)	0.24	53
4990 (125 м) 299	0	1.5	27.0	0.79	–28.27	600 (70)	0.09	54
	50	–1.5	34.0	0.27	–29.98	300 (30)	0.13	39
	107	–1.0	34.0	0.87	–28.67	300 (30)	0.17	51
4983 (550 м) 357	0	2.0	34.3	0.86	–27.62	250 (28)	0.13	33
	40	1.5	34.4	0.39	–27.09	210 (22)	0.16	34
	61	0.5	34.5			120 (14)	0.16	19
	528	0.0	34.7	3.56	–24.77	200 (20)	0.17	34
Станции профиля п-в Ямал–Новая Земля (130 миль)								
4956 (33 м) 19	0	6.0	32.2	2.55	–27.54	600 (60)	0.13	78
	21	5.5	32.4	0.31	–26.83	500 (60)	0.11	55
	31	5.0	32.6	2.56	–26.51	1300 (130)	0.26	338
4960 (120 м) 41	0	5.5	31.0	0.43	–25.85	465 (50)	0.26	121
	18	0.5	32.5	0.23	–29.67	100 (10)	0.13	13
	111	–1.0	33.8	0.65	–25.72	150 (17)	0.23	35
4946 (140 м) 123	0	6.0	28.1	0.34	–26.75	550 (60)	0.23	127
	15	6.5	31.5	0.27	–29.71	500 (60)	0.23	115
	70	–1.2	33.8	0.92	–25.54	400 (40)	0.23	92

* Приводится среднее значение и (в скобках) доверительный интервал.

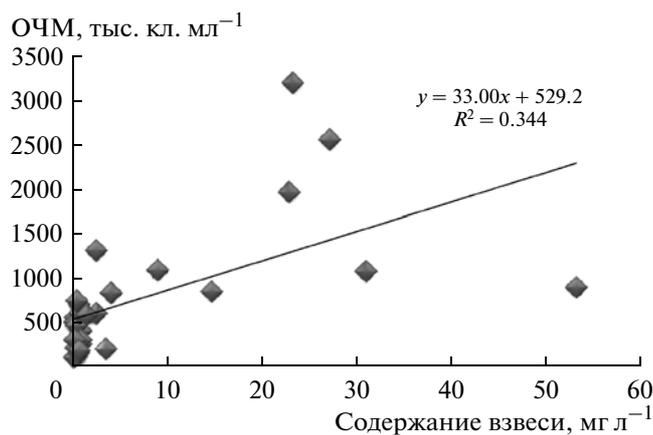


Рис. 2. Зависимость общей численности микроорганизмов (ОЧМ) от содержания водной взвеси.

Ось X – содержание взвеси, мг л^{-1} , ось Y – ОЧМ, тыс. кл. мл^{-1} .

В поле рисунка: $Y = 33.0x + 529.2$, $R^2 = 0.344$.

Интенсивности процесса сульфатредукции (СР) оценивали по образованию меченого сероводорода и суммы пиритной, элементной и органической серы из $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ (0.2 мл, 35 мкКи на 5 см^3 осадка), обработку проб проводили согласно методикам, описанным ранее [4].

Для учета численности отдельных физиологических групп бактерий и архей использовали метод предельных разведений. Для высева сульфатредуцирующих микроорганизмов использовали среду Видделя для морских форм [36], а для метаногенных архей – среду Зейкуса [37]. Объем посевного материала составлял 1 см^3 природной пробы. Разведения производили туберкулиновым шприцом по 1 мл. Делали по 5 разведений для каждой повторности.

Для определения содержания метана использовали метод фазово-равновесной дегазации (“headspace” метод). Концентрацию метана измеряли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором “Кристалл-200-ОМ”. Содержание сульфата и хлорида определяли на ионном хроматографе Biotronik (Германия).

Статистическую обработку результатов проводили на персональном компьютере с помощью программы Excel 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая численность бактериопланктона, биомасса, содержание и изотопный состав углерода взвеси. Проведенные исследования показали, что общая численность бактериопланктона (БП) сильно варьировала в разных частях Карского моря (табл. 1). В водах эстуария р. Обь и акватории смешения речных и морских вод численность БП составляла 700–3000 тыс. кл. мл^{-1} , а биомасса 100–570 мкг л^{-1} . На

морских станциях основного профиля от устья р. Обь до желоба Св. Анны наблюдалось явное снижение численности и биомассы БП по мере продвижения к северу. На самой северной станции Обского профиля численность БП составляла 250 тыс. кл. мл^{-1} , а биомасса 33 мкг л^{-1} . Во всех пробах преобладали мелкие палочки и кокки с объемом клеток от 0.1 до 0.2 мкм^3 , реже 0.3 мкм^3 . Наиболее крупные клетки были ассоциированы с частицами детрита и встречались в основном в придонных пробах. На морских станциях численность БП стабильно убывала с глубиной водного слоя, незначительное увеличение по сравнению с вышележащим слоем наблюдалось в придонном горизонте. На мелководных станциях (станции 4993, 4995, 4996, 4999, 5002 и 5003) закономерных изменений численности БП от глубины водного горизонта не было выявлено. На Ямальском профиле численность БП была близка к соответствующей на северных станциях Обского профиля, составляя в поверхностном слое 460–600 тыс. кл. мл^{-1} .

При подсчете клеток бактериопланктона на фильтрах одиночные клетки и клетки, прикрепленные к частицам взвеси, учитывали отдельно. В поверхностном водном слое бактерии, прикрепленные к частицам взвеси, составляли от 20 до 30% от общего числа. С глубиной происходило значительное уменьшение количества одиночных (неприкрепленных) клеток БП. Напротив, количество бактерий, прикрепленных к частицам взвеси, мало изменялось или немного увеличивалось от поверхности ко дну и составляло в придонных горизонтах до 80% от общего числа. Численность БП зависела от общего содержания взвешенного вещества, наиболее отчетливо такая зависимость прослеживалась в придонных горизонтах и на станциях мелководья (рис. 2).

На станциях Обского и Ямальского разрезов получены данные об изотопном составе органического вещества водной взвеси. Из анализа данных следует, что на всех станциях Обского разреза за исключением самой северной станции (4983) в составе ОВ взвеси преобладал изотопно-легкий (–28.0...–30.18%) органический материал, принесенный с суши водами Оби (табл. 1). Органический материал взвеси постепенно обогащался тяжелым изотопом по мере удаления от берега и опреснения поверхностного водного слоя за счет увеличения доли автохтонного планктона (рис. 3). Напротив, на всех станциях Ямальского разреза включая ст. 4956, расположенную в 19 милях от берега, но не подверженную влиянию речного стока, изотопный состав ОВ взвеси был утяжелен (–25.85...–27.54% в поверхностных горизонтах) за счет планктоногенного вещества морского генезиса. Заметна тенденция утяжеления изотопного состава углерода ОВ на станциях Ямальского профиля (4946 и 4960), (рис. 3).

Продукция и время удвоения общей численности бактерий. Для оценки продукции бактериопланктона поставлены эксперименты по определению темновой CO_2 ассимиляции (ТАУ, табл. 2). Низкий уровень ТАУ (0.07–0.17 $\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$) обнаружен в по-

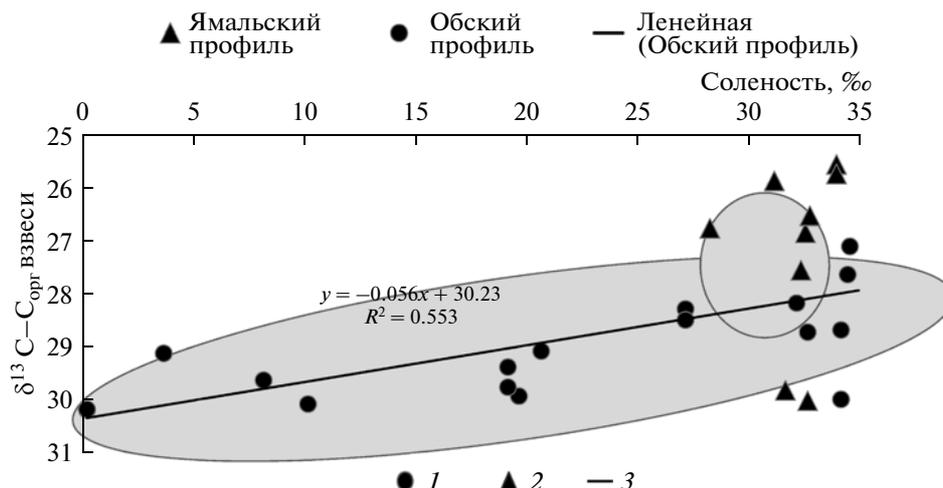


Рис. 3. Зависимость изотопного состава углерода органического вещества водной взвеси от солености поверхностного водного слоя.

Ось *X* – соленость, ‰; ось *Y*: $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_{\text{орг}}$ взвеси.

В поле рисунка: $y = -0.069x + 30.33$, $R^2 = 0.553$.

1 – станции Обского профиля, 2 – станции Ямальского профиля, 3 – линейная (Обский профиль).

верхностных слоях северных станций Карского моря. Величина ТАУ стабильно уменьшалась от поверхности ко дну, достигая весьма низких значений (до $0.02 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$ на ст. 4983 до глубины 528 м). Доля ^{14}C , входящего в состав клеток бактериопланктона, от общей величины ТАУ, составляла от 25 до 67%. Примечательно, что на трех Обских станциях доля ТАУ в составе биомассы была стабильно выше 50%, в то время как на морских северных станциях была ниже 50%.

Отношение величины чистой продукции к биомассе (Р/В коэффициент, сут^{-1}) является объективным показателем удельной продуктивности бактериопланктона. В наших исследованиях величина Р/В коэффициента варьировала от 0.03 до 0.29 на морских станциях и от 0.42 до 0.75 на станциях Обского залива. Прослеживается тенденция снижения Р/В коэффициента с глубиной водного слоя. Р/В коэффициент увеличивается с повышением температуры (рис. 4), однако ряд значений отклоняется от линейной зависимости. Повышенные значения коэффициента соответствуют речным станциям и зонам смешения речных и морских вод, а пониженные значения относятся к станциям Ямальского разреза, испытывающим минимальное влияние речных вод.

Прямые эксперименты по определению времени удвоения численности (G , сут) и биомассы бактериопланктона проведены на ст. 4983. При трехсуточной экспозиции $G = 4.3$ по численности и (4.5 по биомассе) (сут), а при пятисуточной 5.8 по численности и 5.5 по биомассе (сут).

Содержание метана и интенсивность микробного окисления метана в водной толще. Проведенные исследования показали, что содержание метана в по-

верхностном слое водной толщи Карского моря варьирует от $0.18 \text{ мкл CH}_4 \text{ л}^{-1}$ на удаленной станции Ямальского профиля до $2.03 \text{ мкл CH}_4 \text{ л}^{-1}$ в устье реки Обь (табл. 3). Исследованные станции различались по закономерностям распределения содержания метана в зависимости от глубины водного слоя. Так на ст. 5003 значения концентрации метана были близкими в поверхностном и придонном горизонтах с понижением на глубине 14 м. На ст. 4956 значения концентрации CH_4 плавно повышались от поверхностного горизонта к придонному, начиная с 0.68 до $2.04 \text{ мкл CH}_4 \text{ л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$. Напротив, на ст. 4983 значения концентрации CH_4 понижались от поверхностного горизонта к придонному, от 0.36 до $0.04 \text{ мкл CH}_4 \text{ л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$. Нарастание концентрации метана от дна к поверхности (на станциях 4960, 4983, 5002, 5004) свидетельствует о возможной генерации метана в водной толще.

Интенсивности метаноокисления были также невелики. На двух станциях Ямальского разреза и морских станциях Обского профиля (станции 4983, 4990 и 5004) интенсивности МО были низкими (0.06 – $0.9 \text{ нл CH}_4 \text{ л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$). На пресноводной станции Обского разреза (ст. 4993) интенсивность МО составила 141 – $161 \text{ нл CH}_4 \text{ л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$. В процессе окисления углерод метана переходил в CO_2 , запасался в виде органических соединений в составе клеток, а также в составе внеклеточного растворенного органического вещества. На трех речных станциях Обского профиля менее половины углерода метана перешло в состав взвешенного и растворенного органического вещества, в то время как на морских станциях Обского профиля, где общая интенсивность МО была крайне низка, этот показатель достигал 75–85%.

Таблица 2. Биомасса и продукция бактериопланктона в водной толще Карского моря

№ ст., горизонт, м	Биомасса бактерио- планктона, мкг С л ⁻¹	ТАУ (в составе клеток), мкг С л ⁻¹ сут ⁻¹	ТАУ (общая), мкг С л ⁻¹ сут ⁻¹	Продукция, мкг С л ⁻¹ сут ⁻¹	П/Б сут ⁻¹
Станции профиля устье р. Обь–желоб Св. Анны (360 миль)					
4993					
0	21.5	0.804	1.3	16.1	0.75
18	57.1	2.03	2.9	40.5	0.71
4995					
0	14.3	0.364	1.0	7.28	0.51
9	10.7	0.224	0.7	4.49	0.42
4996					
0	33.0	1.09	1.7	21.8	0.66
16	14.9	0.403	0.75	8.05	0.54
4999					
0	11.9	0.125	0.44	2.50	0.21
21	21.4	0.193	0.55	3.85	0.18
5002					
0	13.3	0.106	0.35	2.13	0.16
13	15.8	0.103	0.26	2.05	0.13
22	16.7	0.050	0.18	1.00	0.06
5003					
0	14.8	0.111	0.25	2.22	0.15
14	11.6	0.075	0.18	1.51	0.13
56	9.0	0.023	0.09	0.45	0.05
5004					
0	9.35	0.075	0.17	1.49	0.16
20	3.24	0.015	0.05	0.29	0.09
107	5.28	0.008	0.02	0.16	0.03
4990					
0	5.4	0.054	0.14	1.08	0.2
50	3.9	0.018	0.04	0.35	0.09
107	5.1	0.011	0.032	0.23	0.045
4983					
0	3.25	0.047	0.07	0.94	0.29
40	3.36	0.044	0.08	0.87	0.26
61	1.92	0.018	0.03	0.37	0.19
528	3.4	0.006	0.02	0.12	0.035
Станции профиля п-в Ямал–Новая Земля (130 миль)					
4956					
0	7.8	0.082	0.15	1.64	0.21
21	5.5	0.050	0.12	0.99	0.18
31	33.8	0.20	0.66	4.06	0.12
4960					
0	12.1	0.272	0.51	5.44	0.45
18	1.3	0.027	0.09	0.53	0.41
111	3.45	0.019	0.06	0.38	0.11
4946					
0	12.7	0.183	0.38	3.67	0.29
15	11.5	0.184	0.33	3.68	0.32
70	9.2	0.037	0.10	0.74	0.08

Характеристика донных осадков, органическое вещество и солевой состав иловых вод. В Карском море вещественный состав осадков определяется терригенным поступлением в основном с водами рек Обь и Енисей. Осадки обширного мелководья, как правило, имеют неоднородный гранулометрический состав. Изученные отложения Обского залива были представлены как песчаными, так и пелитово-алевритовыми илами (табл. 4). Поверхностный слой осадка ст. 4993 состоял из рыхлого черного сапропелевого ила. С удалением от устья Оби в составе осадков увеличивалось содержание пелитовой фракции, цвет осадков менялся с коричневого на серый и серо-зеленый. Отобранные осадки имели высокий показатель влажности 86–94% в слое 0–1 см и 77–88% в нижележащих слоях до глубины 30 см.

В изученных осадках слабое понижение значений E_h свидетельствует о низкой активности анаэробных процессов, хотя рост величины общей щелочности (до 3.5–4.8 мг экв на горизонте 1–7 см и до 6.8–7.4 мг экв на глубине 90–160 см; (табл. 4) и уменьшение концентрации сульфат-иона связаны с протеканием анаэробных процессов, особенно сульфатредукции.

Концентрация метана и интенсивности процессов метаногенеза (МГ), метаноокисления (МО) и сульфатредукции (СР) в донных осадках. Концентрация CH_4 в осадках поверхностного окисленного слоя 0–1 см колебалась от 30 мкл CH_4 $дм^{-3}$ в желобе Святой Анны на глубине 528 м (ст. 4983) до 240–290 мкл CH_4 $дм^{-3}$ в осадках прибрежных мелководных станций 4957 и 4999) (табл. 4). Концентрация метана в поверхностном слое всех изученных осадков на порядок и более величин превышает концентрацию метана в наддонной воде. Для Карского моря характерно неравномерное распределение содержания метана в поверхностных слоях осадков, что связано с различием качества и количества ОВ взвеси, определяющей протекание микробных процессов. В колонке ст. 4950 содержание метана увеличивалось уже в первых 7 см и нарастало с глубиной осадка достигая значений 290 мкл CH_4 $дм^{-3}$, а на ст. 4983 концентрация метана была практически неизменной в исследованных горизонтах осадка (27–58 мкл CH_4 $дм^{-3}$).

Процесс МГ обнаружен во всех образцах исследованных осадков, начиная с наддонной воды и поверхностного окисленного слоя (табл. 5). Интенсивность процесса, минимальная в наддонной воде (1.0–3.5 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$), резко возрастала уже в окисленном слое осадка на глубине 0–1 см (44–250 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$) и далее слабо возрастала с глубиной. Относительно высокие интенсивности МГ (до 450–520 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$), измерены в осадках Обского залива.

Одновременно с образованием метана показан и количественно рассчитан процесс его окисления. Численные значения интенсивности МО в среднем совпадают с величинами интенсивности метанобразования. В осадках ст. 4983 повышенная интенсивность МО показана в окисленном поверхностном

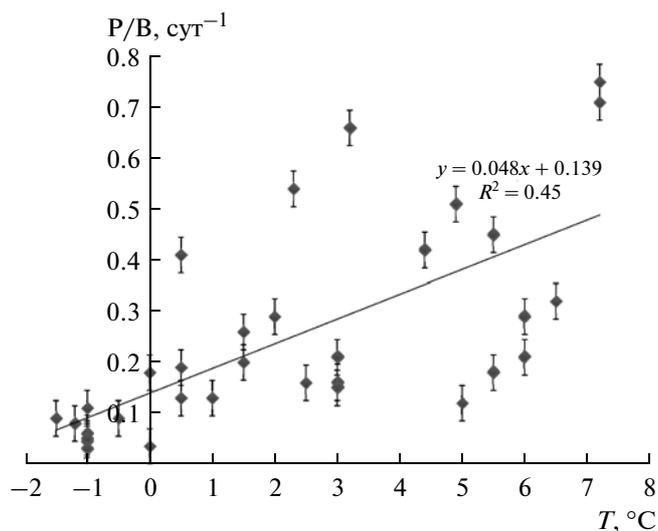


Рис. 4. Зависимость P/B коэффициента от температуры воды.

Ось X — температура воды, °C; ось Y — P/B, сут⁻¹.

В поле рисунка: $y = 0.048x + 0.139$, $R^2 = 0.450$.

горизонте (72.7 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$), в нижележащих горизонтах интенсивность процесса падает до 10–30 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$, а затем вновь возрастает на горизонтах 80–90 и 150–160 см. На станциях 4993 и 4996 Обского профиля выявлена максимальная интенсивность МО — 1800–2000 нл CH_4 $дм^{-3}$ $сут^{-1}$. Здесь аэробные метанотрофы активно функционируют в поверхностном окисленном осадке, хотя не исключено протекание процесса анаэробного метаноокисления в локальных микрозонах этих же осадков. В слабо восстановленной толще колонки также вероятно протекание как аэробных, так и анаэробных процессов окисления метана.

Процесс сульфатредукции (табл. 5) зарегистрирован во всех изученных слоях осадков (от 4 до 184 мкг S $дм^{-3}$ $сут^{-1}$). В наддонной воде интенсивность СР варьировала от 0.27 мкг S $дм^{-3}$ $сут^{-1}$ (ст. 4983) до 2.5 мкг S $дм^{-3}$ $сут^{-1}$ (ст. 4996). Сравнение двух основных анаэробных процессов показывает, что процесс сульфатредукции вносит заметно больший вклад в потребление $C_{орг}$, по сравнению с процессом метаногенеза.

Проведенный учет численности анаэробных микроорганизмов методом высева десятикратных разведений на селективные питательные среды показал, что в 1 см³ поверхностного горизонта осадка ст. 4983 содержится 10^1 и 10^2 способных к росту клеток метаногенов и сульфатредукторов, а в горизонте 1–7 см 10^2 и 10^2 клеток соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общая численность бактерий, выявляемая микроскопическим методом с применением различных красителей, вероятно, является наиболее прямым

Таблица 3. Содержание метана и интенсивность мета-ноокисления в водной толще Карского моря

Станция, горизонт, м	[CH ₄], мкл л ⁻¹	МО ₂ , нл CH ₄ л ⁻¹ сут ⁻¹	МО, % в биомассу и РОВ
Станции профиля устье р. Обь–желоб Св. Анны			
4993			
0	0.70	141	32
18	0.88	161	44
4995			
0	2.03	33	34
9	0.83	13	47
4996			
0	0.80	14	40
16	0.52	12.5	49
4999			
0	0.45	1.5	66
21	0.42	0.8	59
5002			
0	0.40	4.5	65
15	0.33	2.9	73
22	0.18	1.6	68
5003			
0	0.46	1.7	79
14	0.26	1.9	87
56	0.43	1.9	62
5004			
0	0.35	0.8	65
20	0.35	0.7	74
107	0.11	0.9	78
4990			
0	0.25	0.14	79
50	0.04	0.19	86
107	0.25	0.44	66
4983			
0	0.36	0.11	85
40	0.21	0.06	75
61	0.09	0.03	76
528	0.04	0.05	75
Станции профиля п-в Ямал–Новая Земля			
4956			
0	0.68	1.9	65
21	1.87	2.4	63
31	2.04	2.6	78
4960			
0	0.43	0.8	80
18	0.13	0.7	71
111	0.20	0.5	72
4946			
0	0.18	0.7	81
15	0.05	0.2	65
70	0.19	0.8	76

показателем обилия бактериопланктона. В экспедиции 1993 г. (август–сентябрь) [13] численность и биомасса БП была определена на 32 станциях в 215 пробах (табл. 8). Численность бактерий в большинстве проб воды измерялась десятками тысяч и тысячами клеток в 1 мл. По этим данным численность бактерий в Карском море оказалась на порядок ниже, чем в море Лаптевых [24], Чукотском [7] и Баренцевом [14] морях. Было показано, что численность БП заметно возрастала в южной части Карского моря вблизи устьев Оби и Енисея. В 2001 г. немецкие исследователи [32] получили данные общей численности и продукции бактерий открытой акватории Карского моря и заливов Оби и Енисея. Численность бактериопланктона на всех исследованных станциях заметно превышала показатели 1993 г. и составляла 200–500 тыс. кл. мл⁻¹ (табл. 6). Наиболее высокая численность БП была обнаружена в зоне смешения морских и речных вод при солености 5–15‰ (1.6–2.4 × 10⁶ кл. мл⁻¹).

Наши данные оказались близки к данным немецких исследователей, однако в наших учетах максимальная численность БП была выявлена в водах залива Оби. Таким образом, по общей численности бактерий открытая часть Карского моря не уступает остальным морям Арктики: Баренцеву, Белому, Лаптевых и Чукотскому [20, 21, 24, 30]. Действительно, обильно поступающее в Карское море терригенное органическое вещество служит субстратом для развития гетеротрофного бактериопланктона. Аллохтонное происхождение взвешенного органического вещества хорошо подтверждается его легким изотопным составом, а также утяжелением С–С_{орг} по мере разбавления речных вод морскими на всем протяжении Обского профиля вплоть до северной части Карского моря с прекращением влияния вод речного стока в придонном горизонте станции 4983 (δ¹³C–С_{орг} = –24.77‰, табл. 1, рис. 3). Напротив, на Ямальском профиле влияние солености на изотопный состав углерода взвеси не было показано. Опреснение поверхностного водного слоя на станции 4946 было вызвано не речными водами, а последствием обильного таяния льда, что фиксировалось на космических снимках. Изотопный состав углерода в этом поверхностном слое был даже тяжелее (δ¹³C–С_{орг} = –26.75‰) относительно нижележащего водного слоя.

Впервые, аномально легкий изотопный состав углерода речного взвешенного органического вещества р. Обь (до –29.4‰), по сравнению с речным взвешенным материалом других рек от –25.5 до –26.3‰ [34] показан при анализе данных экспедиции в Карское море в 1993 г. [10]. Последующие исследования (сентябрь 1997 г., НИС “Академик Борис Петров”) повторили [3] находку легкого органического вещества взвеси эстуарных зон Оби и Енисея (до –30.7‰ при солености 2/4 г/л). С помощью планктонных сетей были сконцентрированы “пресноводные комплексы”, в которых преобладали диатомовые водоросли и зеленые нитчатые водо-

Таблица 4. Геохимические параметры наддонной воды и донных осадков и химический состав иловых вод

№ станции	Описание осадка*	Горизонт, см	Влажн., %	Eh, мВ	Alk, мг-экв л ⁻¹	SO ₄ ²⁻ , г л ⁻¹	CH ₄ , мкл дм ⁻³
Станции профиля п-в Ямал–Новая Земля (130 миль)							
4957	Ил из рыхлых агрегатов пелитовых частиц	над. вода			2.2	0.78	3.2
		0–1	94	100	2.4	0.79	290
		1–7	84	50	2.6	0.71	270
4960	Ил из рыхлых агрегатов пелитовых частиц с черными хлопьями	над. вода			2.4	0.92	0.16
		0–1	97	80	3.6	0.90	67
		1–7	88	60	4.4	0.83	159
4950	Пелитовый ил, серый, однородный, без слоистости	над. вода			2.8	0.82	0.19
		0–1	93	100	3.2	0.84	27
		1–7	88	20	3.4	0.75	216
4946**	Алеврито-пелитовый ил, коричневый	7–15	80	0	3.8	0.72	290
		0–1	86	180		0.84	9
Станция в Новоземельском желобе, глубина 345 м							
4970	Алевритово-пелитовый ил, темно-коричневый, однородный	над. вода			2.6	0.92	1.45
		0–3	88	80	3.4	0.96	96
		3–10	77	20	3.6	1.02	104
Станции профиля устье р. Обь–желоб Св. Анны (360 миль)							
4993	Черный сапропелевый ил рыхлый в поверхн. слое	над. вода			2.4	0.02	0.79
		0–1	89	20	3.4	0.02	57
		1–7	82	–20	4.8	0.09	165
4996	Мелкоалевритовый рыхлый ил	над. вода				0.66	
		0–1	94	60	2.6	0.68	86
4999	Алевритово-пелитовый ил, коричневый, однородный	над. вода			2.4	0.92	19.9
		0–1	89	60	2.8	0.91	237
		1–7	86	20	3.4	0.72	110
5003	Мягкий, серо-зеленый, пелитовый ил, гомогенный	над. вода			2.4	0.99	21.2
		0–7	84	10	5.6	1.04	300
4990	Мягкий, серо-голубой, слабо уплотненный алевр-пелит. ил	над. вода			2.2	0.87	1.44
		0–1	88	60	3.4	0.78	104
		1–7	82		3.6	0.74	153
***	Серый ил с примазками гидротроилита	7–15	78		4.2	0.72	133
		90–100	66		6.8	0.72	282
4983	Серый, мягкий, гомогенный пелитовый ил	над. вода				0.92	0.2
		0–1	94	80	4.2	0.78	30
		1–7	91	60	4.0	0.73	33
		7–20	83	20	4.8	0.92	31
***	Более плотный ил серого цвета, с признаками газонасыщенности и с незначительными примазками гидротроилита	20–30	77	0	6.0	0.89	27
		80–90	64	–80	6.6	0.81	54
***	Серый, среднетплотный ил	150–160	62	–140	7.4	0.74	58

* Описание осадков выполнено В.А. Чечко.

** Отбор осадка проводился дночерпателем Океан.

*** Отбор проб проводился ударной геологической трубой.

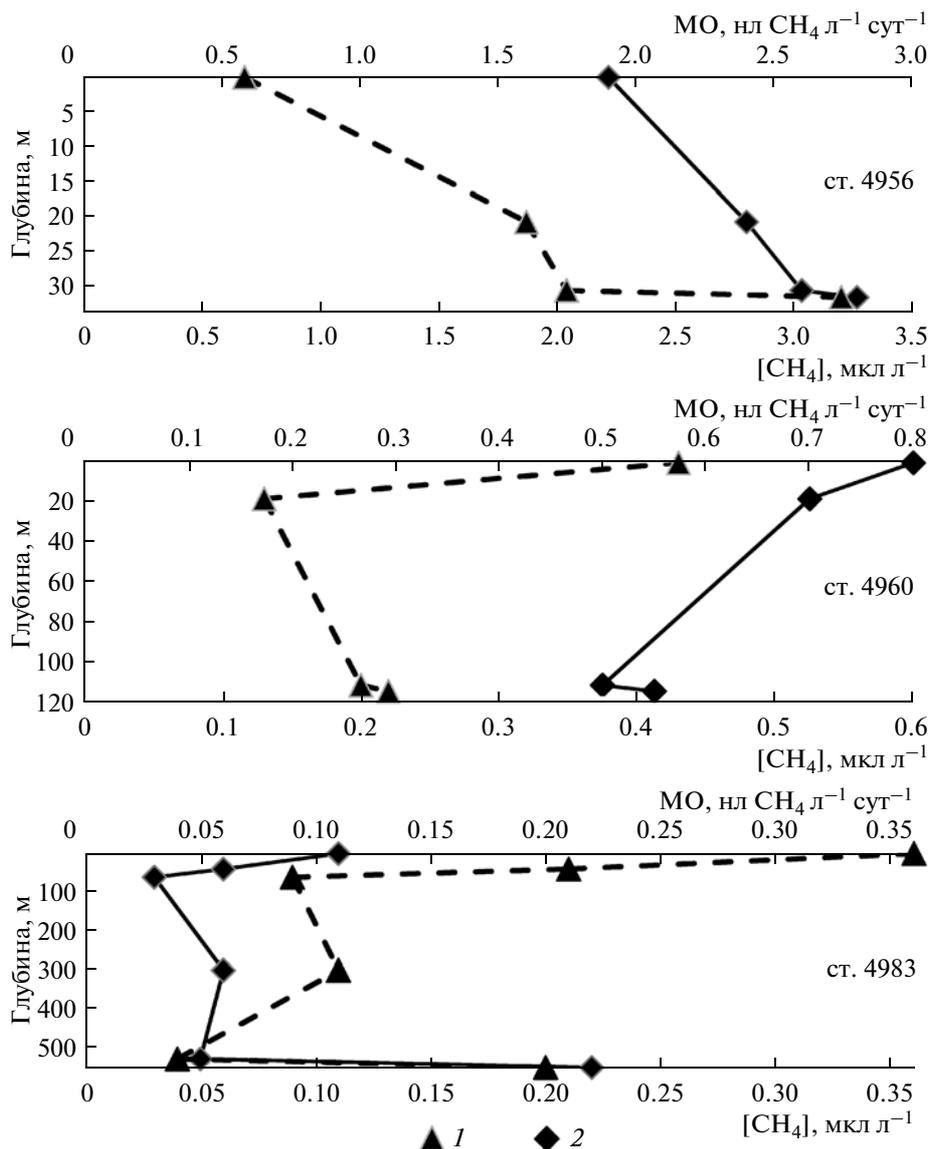


Рис. 5. Содержание метана $[CH_4]$, мкл л⁻¹ и интенсивность его окисления (МО, нл CH₄ л⁻¹ сут⁻¹) в водной толще Карского моря (станции 4956, 4960 и 4883).

1 – содержание метана, 2 – МО.

Ось X нижняя – $[CH_4]$, мкл л⁻¹, ось Y – глубина, м, ось X верхняя – МО, нл CH₄ л⁻¹ сут⁻¹.

росли, изотопный состав углерода которых был облегчен вплоть до значений $-31...-34\%$. [3].

Значительные различия в величине численности бактериопланктона по сравнению с исследованиями 1993 г. можно объяснить как межгодовыми вариациями, так и изменением методики учета БП с просмотром изображений клеток бактерий на экране монитора, что дает возможность выявлять как мелкие клетки, так и клетки, прикрепленные к частицам взвеси. Применение такого метода повысило точность измерения среднего объема клеток (в наших исследованиях составивший $0.09-0.26$ мкм³).

По некоторым литературным данным клетки бактериопланктона в Арктических морях мельче, чем в морях умеренных широт [14]. Наши данные не подтвердили такое предположение, а именно средний объем клеток бактериопланктона Карского моря оказался близок к среднему объему клеток бактерий в Черном море – $(0.073-0.238$ мкм³) [15].

Рассчитанная нами величина суточной продукции бактериопланктона варьировала в широких пределах от 0.12 до 40 мкг С л⁻¹ сут⁻¹. Максимальная продукция выявлена на речных станциях, соответственно минимальная – в северной части Карского

Таблица 5. Интенсивность микробных процессов в наддонной воде и донных осадках Карского моря

№ станции	Горизонт, см	СР, мкг S дм ⁻³ сут ⁻¹	МГ, нл CH ₄ дм ⁻³ сут ⁻¹	МО, нл CH ₄ дм ⁻³ сут ⁻¹	ТАУ, мкг С дм ⁻³ сут ⁻¹
Станции профиля п-в Ямал–Новая Земля (130 миль)					
4957	над. вода	1.05	2.7	2.8	0.32
	0–1	59.5	253	147	11.4
	1–7	132	369	254	5.1
4960	над. вода	1.69	2.8	0.55	0.72
	0–1	122	114	1.0	22.8
	1–7	133	210	200	86.2
4950	над. вода	0.72	1.5	4.4	0.17
	0–1	7.6	44	58	5.8
	1–7	72.9	124	86	15.2
4946*	7–15	110	217	221	24.1
	0–1	124	20.9	24.3	38.5
Станция в Новоземельском желобе, глубина 345 м					
4970	над. вода	0.52	2.1	3.2	0.67
	0–3	14.6	139	96	7.07
	3–10	30.0	191	133	25.4
Станции профиля устье р. Обь–желоб Св. Анны (360 миль)					
4993	над. вода	0.98	3.5	11.6	3.15
	0–1	61.3	447	1990	184
	1–7	97.3	516	1816	147
4996	над. вода	2.5	5	4.4	1.02
	0–1	4.9	211	1990	2.08
4999	над. вода	0.82	2.5		0.85
	0–1	5.4	65.8		2.24
	1–7	11.8	161		45.3
5003	над. вода	0.93	2.9	3.1	0.11
	0–7	156	405	468	80.6
4990	над. вода	0.72	2.3	2.8	0.12
	0–1	60.7	239	181	98.2
	1–7	82	214	234	113
	7–15	126	255	190	118
**	90–100	184	280	167	134
4983	над. вода	0.27	1.0	0.22	0.12
	0–1	4.2	53.2	72.7	4.68
	1–7	7.2	59.7	29.4	12.6
	7–20	18.4	55.7	9.7	16.2
	20–30	74.7	159	19.3	77.9
**	80–90	59.0	256	121	65.0
**	150–160	68.0	190	144	58.1

Примечание. Интенсивности микробных процессов: СР – сульфатредукции, МГ – метаногенеза, МО – метанокисления, ТАУ – темновой ассимиляции углекислоты.

* Отбор осадка проводился дночерпателем Океан.

** Отбор проб проводился ударной геологической трубой.

Таблица 6. Численность (ОЧМ), биомасса (БП) продукция (П) бактериопланктона, а также П/Б коэффициент в Карском море по данным разных авторов

Район проведения исследования	Сезон	ОЧМ тыс. кл. мл ⁻¹	Биомасса БП, мкг л ⁻¹	П бактерий мкг С л ⁻¹ сут ⁻¹	П/Б сут ⁻¹	Источник
Карское море (открытая часть, слой до 30 м)	Август–сентябрь 1993	32 ± 24 (N = 24)	12 ± 9 (N = 24)	н.д.	н.д.	[13]
Карское море (открытая часть, слой под 30 м)		12 ± 10 (N = 18)	5.5 ± 3 (N = 18)	н.д.	н.д.	
Карское море (глубина до 30 м)		65 ± 33 (N = 31)	26 ± 18 (N = 31)	н.д.		
Залив реки Обь		146 ± 105 (N = 15)	72 ± 54 (N = 15)	н.д.	н.д.	
Карское море (открытая часть)	Август–сентябрь 2001	200–500 (N = 13)	29* – 71*	2.5 ± 1.5 (N = 13)	0.18* – 0.28*	[32]
Эстуарий р. Обь (сол. 5–15)		1600–2400 (N = 7)	230*–340*	5.8 ± 1.9 (N = 13)	0.10* – 0.18*	
Р. Обь (сол. 0)		1200–1700 (N = 8)	170*–240*	13.5 ± 7.0 (N = 13)	0.28* – 0.45*	
Карское море (слой до 30 м)	Август–сентябрь 2007	280 ± 100 (N = 7)	50 ± 25 (N = 7)	1.2 ± 0.4 (N = 7)	0.23 ± 0.1 (N = 7)	Наши данные
(открытое море) слой под 30 м		190 ± 100 (N = 7)	30 ± 14 (N = 7)	0.37 ± 0.25 (N = 7)	0.18 ± 0.1 (N = 7)	
Карское море (глубина до 30 м)		560 ± 250 (N = 14)	95 ± 54 (N = 14)	2.9 ± 1.6 (N = 14)	0.29 ± 0.15 (N = 14)	
Залив реки Обь		700 – 2500 (N = 8)	150–330 (N = 8)	15 ± 10 (N = 8)	0.5 ± 0.23 (N = 8)	

Примечание. N – количество измерений, н.д. – нет данных.

* Расчет величины биомассы выполнен на основании оригинальных данных общей численности бактерий и пересчетных коэффициентов, полученных нами при выполнении настоящей работы. Расчет П/Б коэффициента выполнен на основании данных продукции бактерий и расчетных данных биомассы бактериопланктона.

Таблица 7. Содержание метана [CH₄] и интенсивность метаноокисления (МО) в водной толще Карского моря

Район проведения исследования	Сезон	Соленость, ‰	[CH ₄], мкл л ⁻¹	МО, нл CH ₄ л ⁻¹ сут ⁻¹	Источник
Карское море открытая часть, (слой до 30 м)	Август–сентябрь 1993	23–33	0.05–0.40 (N = 11)	0.9–8.8 (N = 11)	[16]
Карское море (открытая часть, слой под 30 м)		32–34	0.06–0.72 (N = 7)	1.1–6.80 (N = 7)	
Карское море (глубина до 30 м)		9–33	0.30–1.36 (N = 13)	4.6–26.1 (N = 13)	
Залив реки Енисей		0.04–0.9	1.5–14.4 (N = 9)	21–201 (N = 9)	
Карское море (слой до 30 м)	Август–сентябрь 2001	26–33	0.1–1.1 (N = 12)	н.д.	[3]
(открытое море) слой под 30 м		26–33	0.1–0.8 (N = 12)	н.д.	
Карское море, (глубина до 30 м)		10–25	0.4–2.4 (N = 10)	н.д.	
Залив реки Обь		0–0.7	1.0–6.6 (N = 9)	н.д.	
Карское море открытая часть, (слой до 30 м)	Август–сентябрь 2007	19–34	0.18–0.46 (N = 10)	0.11–0.9 (N = 10)	Наши данные
(открытое море) слой под 30 м		32–34	0.04–0.43 (N = 9)	0.03–1.9 (N = 9)	
Карское море (глубина до 30 м)		10–32	0.33–2.04 (N = 8)	0.8–4.5 (N = 8)	
Залив реки Обь		0.1–8.0	0.7–2.03 (N = 6)	13–161 (N = 6)	

Примечание. н.д. – нет данных, N – количество проб.

Таблица 8. Продукция H_2S и его производных, продукция CH_4 и его потребление в верхнем горизонте (0–10 см) осадков Арктических морей

Водоем	Глубина, м	Температура придонной воды, °С	Продукция H_2S , мг $S\ m^{-2}\ сут^{-1}$	Продукция CH_4 , мкл $CH_4\ m^{-2}\ сут^{-1}$	Окисление CH_4 , мкл $CH_4\ m^{-2}\ сут^{-1}$
Карское море [7]	26–150	–1.4	3–20 (5)*	94–730 (5)	0.4–11 (5)
Дельта р. Енисей [7]	14–32	–0.8–8.5	4–140 (4)	60–150 (4)	1.9–290 (4)
Дельта р. Обь [7]	13–24	–0.9–6.0	5–50 (4)	340–2060 (4)	0.5–7400 (4)
Белое море (Бассейн) [19]	54–290	–1.0–1.0	2.6–22 (4)	15–78 (4)	13–56 (4)
Белое море (Онежский и Двинский заливы) [19]	8–55	1.5–4.0	8–35 (5)	14–71 (5)	21–29 (5)
Чукотское море (южная часть) [20]	40–48	1.5–3.0	5–90 (3)	126–950 (3)	109–141 (3)
Чукотское море (каньон Геральда) [20]	72–103	–1.4...–0.5	2–23 (3)	13–86 (2)	18–55 (2)
Карское море (Ямальский разрез)	33–120	–1.2–5.0	5–12 (3)	10–31 (3)	9–20 (3)
Карское море (устье р. Обь)	11–29	2.3–7.2	0.9–11 (3)	12–47 (3)	45–185 (3)
Карское море (желоб Св. Анны)	125–550	–1.0–0.0	0.7–7 (2)	5–24 (2)	4–19 (2)

* В скобках количество донных станций, по которым проведен расчет.

моря. Относительно высокая продукция обнаружена в водной толще западной части Карского моря у п-ва Ямал (до $5.5\ \text{мкг}\ C\ л^{-1}\ \text{сут}^{-1}$).

В результате Р/В коэффициенты, рассчитанные для поверхностных вод, варьировали в близких пределах: 0.51–0.75 в устье р. Обь, 0.21–0.29 на станциях Ямальского разреза и 0.16–0.29 в открытой части Карского моря. Значительные различия в Р/В коэффициентах, рассчитанных для бактериопланктона разных горизонтов одного водного столба, указывают на то, что бактериальные популяции имеют разную эффективность метаболизма. Снижение коэффициента до 0.03–0.08 на глубинах начиная с 70 м, где температура воды имеет отрицательное значение, указывает на предельно низкую эффективность метаболизма. Проведенные на ст. 4983 эксперименты по определению времени удвоения численности и биомассы бактериопланктона (G , сут) показали принципиальную сходимость с данными, характеризующими удельную метаболическую активность бактериопланктона Карского моря, выраженную в величине Р/В коэффициента (μ , сут^{-1}). Известно, что эти параметры связаны друг с другом согласно формуле $G = \ln(2)\mu^{-1} = 0.693\ \mu^{-1}$ [28].

Для понимания закономерностей функционирования цикла углерода необходимо знать межгодовую вариабельность отдельных процессов. В августе–сентябре 1993 г. впервые была измерена и рассчитана концентрация метана и величина

интенсивности его окисления в водной толще профиля из р. Енисей в Карское море [1, 16]. Повышенная концентрация метана ($1.5\text{--}14.4\ \text{мкл}\ CH_4\ л^{-1}$), а также интенсивность его окисления ($21\text{--}201\ \text{нл}\ CH_4\ л^{-1}\ \text{сут}^{-1}$) были отмечены в речных водах и водах Енисейского залива (табл. 7). Минимальные показатели соответствовали водам северной части моря ($0.05\text{--}0.40\ \text{мкл}\ CH_4\ л^{-1}$ и $0.9\text{--}8.8\ \text{мкл}\ CH_4\ л^{-1}\ \text{сут}^{-1}$). В 2001 г. были проведены исследования содержания метана в водной толще на профиле из реки Обь в Карское море, которые подтвердили закономерность убывания метана на профиле залив–море [3]. В наших исследованиях минимальное содержание метана показано в глубинных водах северных станций, а максимальное, как и в двух предшествующих экспедициях, соответствовало водам залива.

Классическим для водной толщи водоемов является вертикальный профиль концентрации метана с максимумом у дна, что связано с поступлением метана из осадков, и постепенным понижением содержания от дна к поверхности. Такой профиль показан для ст. 6056 с высоким содержанием метана в придонном водном слое и наддонной воде (рис. 5). Однако вертикальные профили станций 4960 и 4983 не относятся к классическим. Повышение концентрации метана и интенсивности его окисления в поверхностных или подповерхностных слоях можно объяснить его образованием “на месте” за счет микробной деструкции свежего органического веще-

ства, протекающей в анаэробных микронизах, приуроченных к частицам взвеси и пелетам зоопланктона. Ранее образование метана непосредственно в аэробной водной толще обнаруживали только в водоемах умеренных широт [31, 33, 18], а также в Баренцевом море [11].

Отбор проб донных осадков с помощью трубки Ниемисте позволил выделять верхний ненарушенный слой осадка с влажностью более 90% (табл. 4). Окислительно-восстановительный потенциал в этом слое был всегда положительным и достигал значений +100 мВ (исключение – ст. 4993, где Eh слоя 0–1 см был +20 мВ). Однако интенсивность анаэробных процессов в этом слое, как правило, лишь незначительно уступала соответствующим показателям в нижележащих горизонтах осадков (табл. 5). В “невзмученной” наддонной воде из трубки Ниемисте непосредственно над осадком (5–10 см) интенсивность всех микробных процессов, а также содержание метана резко падает и становится близким к соответствующим показателям водных образцов, взятых из батометра. Из этого следует, что микробные процессы трансформации органического вещества наиболее активно протекают в частицах взвеси, формирующих поверхностный слой осадка. Низкая температура и относительная бедность органическим веществом определяют общую окисленную обстановку в поровой воде поверхностного слоя осадков Карского моря, что не мешает протеканию микробных процессов и барьерной роли этого слоя, препятствующего проникновению метана в водную толщу.

В табл. 8 приведены результаты определения продукции H_2S и его производных, продукции CH_4 и его потребления в верхнем слое (0–10 см) осадков ряда Арктических морей. Из сопоставления этих данных следует, что в осадках северных станций (желоб Святой Анны) микробная активность всех измеренных процессов минимальна. Столь низкая активность связана с относительно большой глубиной и низкой температурой придонной воды. Однако даже в минимально активных осадках содержатся клетки метаногенных архей и сульфатредуцирующих бактерий, способных к росту на диагностических культуральных средах. Повышенная активность микробных процессов зафиксирована в осадках станций Ямальского разреза и Обского залива. Однако максимальные из полученных данных уступают соответствующим показателям в донных осадках дельты Оби и Енисея, отобранных в 1993 г. (табл. 8). В 1993 г. высокая интенсивность микробных процессов была обнаружена в осадках речных станций 4409 и 4418, наиболее удаленных от моря, где концентрация метана на три порядка превышала концентрацию CH_4 в других осадках района исследования. Наиболее сходными по микробной активности оказались донные отложения Онежского и Двинского заливов Белого моря [19], в то время как поверхностные осадки южной части Чукотского моря обладали в несколько раз более высокой продуктивностью [20].

Авторы благодарят М.В. Флинта – руководителя проекта “Система Карского моря”, а также участников рейса Беляева Н.А., Кравчишину М.Д. и Сажина А.Ф. за дружескую помощь в общей экспедиционной работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-04-00248-а) и программы Президиума РАН “Молекулярная и клеточная биология”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков А.М., Егоров А.В.* Результаты газометрических исследований в Карском море // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 3. С. 399–404.
2. *Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И.* Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 693–703.
3. *Галимов Э.М., Кодина Л.А., Степанец О.В., Коробейник Г.С.* Биогеохимия Российской Арктики. Карское море. Результаты исследований по проекту SIRRO 1995–2003 годы // *Геохимия*. 2006. № 11. С. 1139–1191.
4. *Гальченко В.Ф.* Сульфатредукция, метанобразование и метаноокисление в различных водоемах оазиса Бангер Хиллс, Антарктида // *Микробиология*. 1994. Т. 63. Вып. 4. С. 683–698.
5. *Иванов М.В.* Метод определения продукции бактериальной биомассы в водоеме // *Микробиология*. 1955. Т. 24. Вып. 1. С. 79–89.
6. *Исаченко Б.Л.* Микробиологическая характеристика грунтов и воды Карского моря // *Избр. Труды*. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1951. С. 334–363.
7. *Криси А.Е.* Микроорганизмы восточной части Северного Ледовитого океана // *Микробиология*. 1945. Т. 14. Вып. 4. С. 268–276.
8. *Криси А.Е.* Микробиологическая океанография. М.: Наука, 1976. 269 с.
9. *Кузнецов Л.Л., Байтаз О.Н., Макаревич П.П.* Структурно-функциональные показатели планктонного сообщества Байдаракской губы по материалам осенних экспедиций 1991–1992 гг. // *Биология и океанография Карского и Баренцева морей*. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. С. 88–95.
10. *Леин А.Ю., Русанов И.И., Пименов Н.В. и др.* Биогеохимические процессы циклов углерода и серы в Карском море // *Геохимия*. 1996. № 11. С. 1027–1044.
11. *Леин А.Ю., Пименов Н.В., Русанов И.И. и др.* Цикл метана в Баренцевом море // *Литология и полезные ископаемые*. 2008. № 5. С. 455–479.
12. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др.* Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 748–758.
13. *Мицкевич И.Н., Намсараев Б.Б.* Численность и распределение бактериопланктона в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 704–708.
14. *Мишустина И.Е., Байтаз О.Н., Москвина М.И.* Бактериопланктон Баренцева моря. Исследования 1983–1993 гг. // *Планктон морей Западной Арктики*. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1977. С. 7–50.
15. *Мошарова И.В., Сажин А.Ф.* Гетеротрофный бактериопланктон северо-восточной части Черного мо-

- ря в летний и осенний периоды 2005 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 5. С. 720–728.
16. *Намсараев Б.Б., Русанов И.И., Мицкевич И.Н. и др.* Бактериальное окисление метана в эстуарии реки Енисей и Карском море // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 1. С. 88–93.
 17. *Русанов И.И., Саввичев А.С., Юсупов С.К. и др.* Образование экзометаболических в процессе микробного окисления метана в морских экосистемах // *Микробиология*. 1998. Т. 67. № 5. С. 710–717.
 18. *Русанов И.И., Юсупов С.К., Саввичев А.С. и др.* Микробное образование метана в аэробной водной толще Черного моря // *Докл. РАН*. 2004. Т. 399. № 4. С. 571–573.
 19. *Саввичев А.С., Русанов И.И., Юсупов С.К. и др.* Микробные процессы трансформации органического вещества в Белом море // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 5. С. 689–702.
 20. *Саввичев А.С., Русанов И.И., Пименов Н.В. и др.* Микробные процессы циклов углерода и серы в Чукотском море // *Микробиология*. 2007. № 5. С. 682–693.
 21. *Саввичев А.С., Русанов И.И., Захарова Е.Е. и др.* Микробные процессы циклов углерода и серы в Белом море // *Микробиология*. 2008. № 6. С. 1–16.
 22. *Сажин А.Ф., Мицкевич И.Н., Поглазова М.Н.* Изменение размеров клеток бактериопланктона при фиксации и окрашивании // *Океанология*. 1987. Т. 27. Вып. 1. С. 151–154.
 23. *Сорокин Ю.И.* Бактериальная продукция в водоемах. Итоги науки и техники. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М.: ВИНТИ, 1973. С. 47–102.
 24. *Сорокин Ю.И., Сорокин П.Ю., Проткова Ю.В.* Первичная продукция и распределение планктона в эстуарии реки Лены и прилегающем районе моря Лаптевых // *Докл. РАН*. 1993. Т. 333. № 4. С. 522–525.
 25. *Теплинская Н.Г.* Бактериопланктон и бактериобентос Карского моря // *Экология и биоресурсы Карского моря*. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1989. С. 29–37.
 26. *Amon R.M.W., Meon B.* The biogeochemistry of dissolved organic matter and nutrients in two large Arctic estuaries and potential implications for our understanding of the Arctic Ocean system // *Marine Chemistry*. 2004. V. 92. P. 311–330.
 27. *Hobbie J.T., Daley R.J., Jasper S.* Use of Nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // *Appl. Environ. Microbiol.* 1977. V. 33. P. 1225–1228.
 28. *Kirchman D.* Measuring bacterial biomass Production and Growth Rates from Leucine Incorporation in Natural Aquatic Environments // *Methods in Microbiology*. 2001. V. 30. P. 227–237.
 29. *Kodina L.A.* Carbon isotope composition of phytoplankton in the Yenisei river-estuary-open sea system and the application of isotopic approach for evaluation of phytoplankton contribution to the Yenisei POC load // *Rep. Polar mar. Res.* 2002. V. 419. P. 143–149.
 30. *Lee S.H., Whitley T.E., Kang S.* Recent carbon and nitrogen uptake rates of phytoplankton in Bering Strait and the Chukchi Sea // *Cont. Shelf Res.* 2007. V. 27. P. 2231–2249.
 31. *Marty D.G.* Methanogenic bacteria in seawater // *Limnology and Oceanography*. 1993. V. 38. № 2. P. 452–456.
 32. *Meon B., Amon R.M.W.* Heterotrophic bacterial activity and fluxes of dissolved free amino acids and glucose in the Arctic rivers Ob, Yenisei and the adjacent Kara Sea // *Aquat Microb Ecol.* 2004. V. 37. P. 121–135.
 33. *Oremland R.S.* Methanogenic activity in plankton samples and fish intestines: A mechanism for *in situ* methanogenesis in oceanic surface waters // *Limnol. Oceanogr.* 1979. V. 24. P. 1136–1141.
 34. *Shultz D.J., Calder J.A.* Organic carbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in estuarine sediments // *Geochim. and Cosm. acta.* 1976. V. 40. P. 381–385.
 35. *Sorokin Y.I.* Radioisotopic Methods in Hydrobiology. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1998. 321 p.
 36. *Widdel F.* The genus *Desulfotomaculum* // *The Prokaryotes*. 2nd / Eds. Balows A. et al. New York Berlin: Springer-Verlag, 1992. V. 2. P. 1792–1799.
 37. *Zeikus J.G., Weimer P.J., Nelson D.R., Daniels L.* Bacterial methanogenesis: acetate as a methane precursor in pure culture // *Arch. Microbiol.* 1975. V. 104. P. 129–134.

Microbial Processes of the Carbon and Sulfur Cycles in the Kara Sea

A. S. Savichev, E. E. Zakharova, E. F. Veslopolova, I. I. Rusanov, A. Yu. Lein, M. V. Ivanov

The research performed in September 2007 within framework of 54th flight research vessel “Academik Mstislav Keldysh” in Kara Sea resulted in the microbiological, biogeochemical and geochemical data concerning the rates of the key microbial processes. Researches spent in northern, central, southwest water area of Kara Sea, as well as in the Ob gulf. Quantitative characteristics of the total bacterial number and activity of microbial processes in water column and bottom sediments are received. The total number of bacteria in the water column varied from 250 thousand cells ml^{-1} in northern water area to 3 million cells ml^{-1} in the Ob gulf. The bacterial number depended on the maintenance of a water suspension. Net bacterial production was minimum in the central water area – $0.15\text{--}0.20 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ day}^{-1}$, maximum – $0.5\text{--}0.75 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in the Ob gulf. On the many stations of the Ob trend in the organic particular matter prevailed isotope-easy carbon ($-28.0\text{--}30.18\%$) of terrigenous organic deposit. The methane content in a surface water layer varied from 0.18 to 2.0 $\text{мкл CH}_4 \text{ l}^{-1}$, the rates of methane oxidation varied from 0.1 to 100 $\text{nl CH}_4 \text{ l}^{-1} \text{ day}^{-1}$. Concentration of methane in the upper sediment layers varied from 30 to 300 $\text{мкл CH}_4 \text{ dm}^{-3}$, the rates methane generation – from 44 to 500 $\text{nl CH}_4 \text{ dm}^{-3} \text{ day}^{-1}$, the rates of methane oxidation varied from 30 to 2000 $\text{nl CH}_4 \text{ dm}^{-3} \text{ day}^{-1}$. The rates of sulfate reduction varied from 4 to 184 $\mu\text{g S dm}^{-3} \text{ day}^{-1}$.